第40卷 第12期
2023年12月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 12
Dec. 2023

敦煌太阳总辐射多时间尺度变化特征及影响因素

王云鹏[1]， 李红英[1]， 姚玉璧[2]， 李栋梁[3]， 范琦玮[1]， 刘香萍[4]

(1. 酒泉市气象局,甘肃 酒泉 735000；2. 兰州资源环境职业技术大学,甘肃 兰州 730021；
3. 南京信息工程大学,江苏 南京 210044；4. 敦煌市气象局,甘肃 敦煌 736200)

摘 要：采用集合经验模态分解(EEMD)以及M-K突变检验方法,基于敦煌市1971—2020年太阳总辐射、相对湿度、总云量和沙尘日数等气象资料,分析了敦煌市太阳总辐射演变的多时间尺度特征,探讨了影响敦煌市太阳辐射的关键气象因素。结果表明:(1) 1971—2020年敦煌市年太阳总辐射上升趋势显著,线性气候倾向率为49.6 $MJ\cdot m^{-2}\cdot(10a)^{-1}$,多年平均年辐射量为6354.0 $MJ\cdot m^{-2}$,属于太阳能资源最丰富区。年辐射在1970年代最少,2010年代最大。敦煌市太阳辐射四季分明,辐射量夏季>春季>秋季>冬季,分别以32.5、13.4、2.9 $MJ\cdot m^{-2}\cdot(10a)^{-1}$和1.1 $MJ\cdot m^{-2}\cdot(10a)^{-1}$的速率增加。近50 a敦煌市太阳总辐射以2.9 a和7.1 a的年际变化和16.7 a的年代际变化占主导地位。(2) 月太阳辐射变化呈"单峰型",从3月开始急剧增加,5月达峰值,6月开始逐渐下降,12月达全年最低值。太阳总辐射小时分布呈单峰型,一天中最大值出现在12:00—13:00。(3) 年、春季和夏季太阳辐射变化的突变时间为1997年、2000年和1982年。(4) 影响敦煌太阳辐射的气象要素可归结为三个因子:大气透明度因子、光照因子和湿度因子,不同季节各气象因子与太阳辐射的相关性有所差异。

关键词：太阳辐射；变化特征；集合经验模态方法；突变检验；气象要素；敦煌

太阳辐射是地球上大气运动、水循环和生命活动的主要动力[1]。它是地表水文、生态、农业等陆表过程模拟的重要驱动数据,同时也是太阳能利用的重要指标[2]。地球大气系统接收到的太阳辐射是维持地球气候系统及生态系统能量平衡的重要因子,但受大气透明度、云量、海拔高度、纬度、日照时数等诸多因素的影响,到达地面的太阳辐射量具有地区差异性。太阳辐射对农业生产布局、作物生长、土壤水分蒸发和蒸腾具有重要作用[3]。《"十四五"可再生能源发展规划》中明确指出,以区域布局优化发展,在沙漠、戈壁和荒漠地区为重点加快建设河西走廊等陆上新能源基地,太阳能产业的迅速发展,是落实"双碳"目标的重要举措,甘肃敦煌是太阳能资源和土地资源富集地区之一,被誉为世界光能的黄金地带,目前,已建成全国最大百万千瓦级光伏发电基地。分析该区域太阳辐射时空变化对于农业气候研究和区划、太阳能资源的开发利用等具有十分重要的现实意义。

几十年来,国内外学者对地面太阳辐射的变化特征进行了大量研究[4-8],发现地面的太阳辐射随时间的推移呈阶段性特征[4],表现为按年代际交替出现明显的减少和增加趋势[7-8]。20世纪60—90年代初地表太阳总辐射减少,称为变暗("Global dimming"),之后出现反转,呈现增加趋势[9-11],即出现变亮("Global brightening")。马金玉等[12]研究指出,太阳辐射存在一定的周期变化,影响太阳辐射的云量、风速、日照百分率等因子具有一定的区域性和局地效应;陈志华[13]对1957—2000年中国地面太阳辐射状况进行了研究,认为1960—1990年太阳总辐射气候倾向率为2.54%·$(10a)^{-1}$,自20世纪80年代末以来,大多数测站都观测到了总辐射增加的现象。太阳辐射受季节和地理位置影响较大,其影响因素如大气温度、湿度、日照等的变化特点都可影响太阳辐射的强弱。不同地区太阳辐射的区域性差异

收稿日期：2023-03-20； **修订日期**：2023-10-09
基金项目：甘肃省高等学校产业支撑计划项目"一带一路"太阳能高辐射区光能开发潜力与利用效率评估研究及应用(2020C-34);甘肃省自然科学基金(22JR5RF1080);2022年度酒泉市科技计划项目(2022MB1038)
作者简介：王云鹏(1967-),男,高级工程师,主要从事应用气象研究. E-mail: 25592188@163.com
通讯作者：李红英. E-mail: gsjqlhy@163.com

较大,大部分区域太阳总辐射呈下降趋势[14-15],而东南地区[16]、东北地区[17]和长江三角洲[18]的太阳辐射有所不同,呈先降后升的变化,格尔木[19]则与之相反。针对西北地区的太阳辐射,姚玉璧等[14]指出,中国西北大部分区域太阳总辐射呈显著下降的趋势;杨凤娟等[20]对新疆地面太阳辐射及其CERES/SSF卫星资料适用性研究时指出,总辐射辐照度日变化呈单峰分布,不同季节南疆和北疆辐照度有区域差异,春季南疆明显高于北疆,夏季平均辐照度与全年最相似,冬季次之,秋季差异不大;钱莉等[21]分析了河西走廊东部近50 a来的太阳总辐射和日照时数的变化规律,指出河西走廊东部年平均太阳总辐射在波动中上升,年太阳总辐射、年日照时数的突变增大年与区域内气候开始变暖年同步;武丹[22]利用河西走廊3个辐射站的资料分析了该区域太阳能资源变化规律。目前,对极端干旱的敦煌市太阳总辐射多时间尺度特征及不同时间尺度上的周期振荡对太阳辐射变化总体特征的影响程度研究很少,本研究基于敦煌太阳辐射站的逐时资料,对太阳辐射的多尺度时间特征进行细致分析,研究该区域不同时间尺度地表太阳辐射量的变化特征及趋势,评估太阳能资源的丰富程度,为合理开发利用太阳能资源和农业产业布局提供决策依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

敦煌市地处甘肃、青海、新疆三省(区)的交汇处,位于河西走廊的最西端,介于92°13′~95°30′E,39°40′~41°40′N之间,总面积3.12×10^4 km²,其中,绿洲面积约0.14×10^4 km²,仅占总面积的4.5%。地势南北高,中间低,自西南向东北倾斜,平均海拔1139 m。敦煌市深处内陆,四周受戈壁、沙漠包围,气候干燥,降雨量少,蒸发量大,日照时间长,日照充足,全年日照时数为3298.8 h,年平均降水量44.6 mm,蒸发量2690.9 mm,年平均气温10.4 ℃[23],属极端干旱区,太阳能资源丰富,且境内地势较平坦,具备了开发利用太阳能的优势。境内植被多为旱生的灌木和半灌木,主要土壤类型有灌淤土、潮土、风沙土、沼泽土、盐土和草甸土等。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 资料来源 利用敦煌气象站1971—2020年逐日的太阳总辐射、日照、水汽压、相对湿度、蒸发、气温、最高气温、最低气温、总云量等资料,该资料均来源于全国综合气象信息共享平台(CIMISS),由甘肃省气象信息与技术装备保障中心提供统一数据服务接口(http://10.166.64.50:8088/cmadaas/),未出现连续缺失的情况,对于极个别缺失数据采用3 a滑动平均值替代。上述气象要素的数据精度和可靠性均严格按照中国气象局地面气象观测规范中地面气象观测仪器的基本技术性能[24]执行。四季的划分为春季3—5月、夏季为6—8月、秋季为9—11月、冬季为12月至次年2月。文中太阳总辐射小时数据时间为北京时。

1.2.2 计算方法

(1) 气候倾向率

采用气候倾向率法分析敦煌市1971—2020年太阳辐射的变化趋势,线性方程的斜率表征时间序列的平均趋势,即$y=b+at$,其中,t为时间序列;b为回归截距;a为回归斜率,$a>0$表明太阳辐射随时间变化整体呈上升趋势,反之,$a<0$时,太阳辐射呈下降趋势。采用F检验判断气候倾向率的显著性($\alpha=0.05$)。

(2) Mann-Kendall(M-K)突变检验

M-K是用于检验太阳辐射时间序列发生突变位置的非参数检验方法,受人为因素影响较小,定量化程度高。通过定义正序列UF、反序列UB这2个统计量并进行序列分析,得到原气候样本序列的变化趋势[19],当UF或$UB>0$表示辐射呈上升趋势,UF或$UB<0$则呈下降趋势。当UF、UB曲线在置信区间内存在交点,则该点为突变点。当UF或UB曲线超过置信区间,表明辐射变化显著。

(3) 采用集合经验模态方法(EEMD)

EEMD方法是2009年Wu等[25]提出的一种对非线性非平稳信号分析和处理的方法,是经验模分解(EMD)方法的改进版,它能自动将信号中存在的不同时间尺度波动逐级拆分开来,自动产生一系列具有不同时间尺度的数据序列,可以很好地解决信号在分解过程出现的模态混叠问题。其主要步骤为:首先利用高斯白噪声具有频率均匀分布的统计特性[26-29],将一组白噪音添加到原始序列中来提供一个相对高频、均匀的极值分布;其次,对加入白噪音的时间序列进行经验模态分解(EMD),即根据时间序列的瞬时特征提取各本征模态函数(IMF),对各IMF分量进行希尔伯特—黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT),得到解析信号;最后将各IMF分量

多次进行集合平均以抵消加入白噪音对真实信号的影响[30]。本文采用EEMD可自适应提取各个本征模态，能更好地提取长时间序列趋势变化的信息，尤其是EEMD趋势项所得到的非线性变化趋势能反映气候真实的变化趋势[31-32]。EEMD本质是将非线性、非平稳信号中蕴藏的多个单一频率的波动项分离出来，自然界中大部分的数据都是一种混合的非稳态时间序列，是非常复杂而且不容易进行分析的，但该算法的优势就是可以从非稳态时间序列中将局部特征进行提取，得到只包含局部特征值的IMF。从理论上来说，EEMD算法能够分解任意信号，这一特性特别适用在处理不平稳信号和耦合信号数据过程中，因此，这一算法在设计出来以后就在很多领域中得以推广和使用，也表现出了较好的特性。如在农业气象领域中的干旱受灾研究[33]、提取产量和价格等农业统计指标的波动特征[34]，气象领域中气温[35]、降水[36]等多尺度变化特征、太阳辐射预测[37]和光伏电站短期出力预测[38]等方面进行了广泛应用，EEMD算法中用到的两个重要参数是白噪声的幅值(k)和重复进行EMD分解的总次数即加噪次数(M)。经过对实际信号的分析比较，Huang等[39]建议添加的噪声幅度k设定为0.2，M设为几百次。茆美琴等[38]提出噪声幅度k设定为0.2~0.3之间，根据前人的研究，本文将噪声幅度k分别设定为0.2和0.3，将加噪次数M依次设定为100，200，300，……，直到1000，这样就得到20组k和M的组合，对每组k和M进行分析比较和显著性检验，发现20个组合中所呈现的结果差异性较小，本文中选取重构后与原序列差异最小的噪声幅度k为0.2，分解总次数M为500进行分析。

（4）因子分析

为了进一步梳理各种气象因素对太阳辐射的影响，用数据统计分析SPSS软件进行影响因素的因子分析。

2 结果与分析

2.1 太阳总辐射的年际和年代际变化

敦煌市多年来年平均太阳总辐射为6354.0 MJ·m^{-2}，根据太阳能资源评估方法GB/T 37526-2019国家标准，年太阳总辐射值≥6300 MJ·m^{-2}为太阳能最丰富区，可见，敦煌市属于太阳能资源最丰富区。统计发现，敦煌市年平均太阳辐射在波动中上升，线性上升速率为49.6 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$，通过0.05的显著性检验（图1），有52%的年份总辐射超过平均值，主要集中在1980年代后期以来。最大值出现在1988年，为6960.6 MJ·m^{-2}；最小值出现在2010年，为5304.0 MJ·m^{-2}。调查发现，2010年各月太阳总辐射均有不同程度的减少，尤其是4—10月减少幅度较大，分析影响太阳辐射的各气象因素，发现2010年敦煌市沙尘、相对湿度、降水日数、总云量等有异常特征。具体而言，4—8月沙尘日数比历年同期明显偏多，其中，4月沙尘暴日数为4次，是1971年以来历史同期最多的，5—8月扬沙日数为50 a来历史同期第4多，8月出现2次浮尘天气，为2005年以来最多；2—5月和7—10月敦煌市相对湿度比历年同期明显偏大，尤其是9—10月位居历史同期第一；3月、9月和10月敦煌市降水日数比历年同期偏多，其中，9—10月降水日数为近50 a同期最多；春季总云量为近50 a同期第2多，多种因素综合作用致使2010

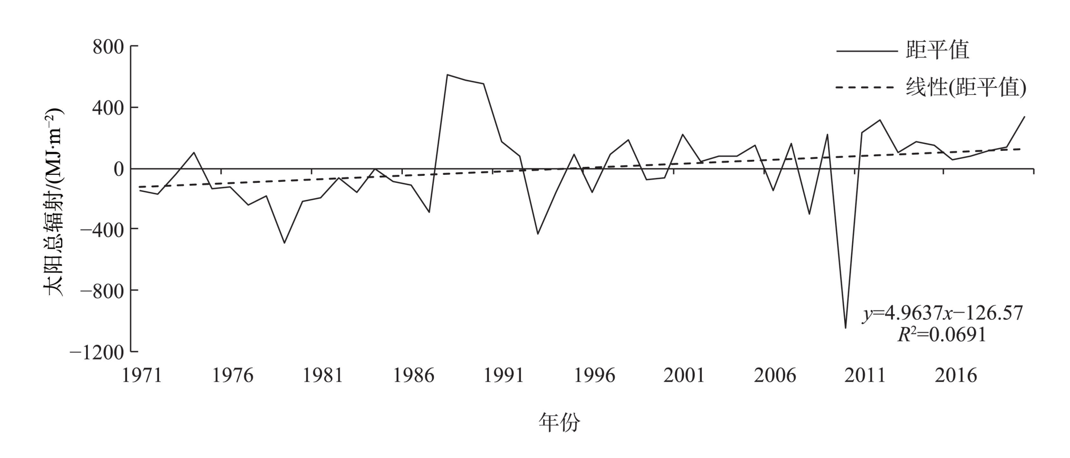


图1　1971—2020年敦煌市年太阳总辐射距平变化

Fig. 1　Variation of annual total solar radiation anomaly in Dunhuang City during 1971-2020

年敦煌市太阳辐射为近50 a最小。从图1可以看出，敦煌市年太阳总辐射量在1987年以前的大部分年份年太阳总辐射距平小于零，而1987年以后，仅有8 a距平值小于零，即1971—1987年为明显的年太阳辐射偏小期，该期平均值为6203.0 MJ·m^{-2}，比多年平均值少150.8 MJ·m^{-2}，而1988—2020年的平均值为6431.7 MJ·m^{-2}，比多年平均值多77.7 MJ·m^{-2}。敦煌市太阳总辐射年代际特征分明，1970年代敦煌市年太阳总辐射为6189.8 MJ·m^{-2}，是50 a中太阳总辐射最少的时期，1980—2000年代太阳总辐射依次下降，1990年代太阳辐射下降最快，比1980年代少了110.3 MJ·m^{-2}，2000年代下降趋势明显变缓，2010年代太阳总辐射迅速上升至6523.2 MJ·m^{-2}，是50 a来太阳辐射最多的时期，比最少的1970年代增加了333.4 MJ·m^{-2}。对每个年代际的太阳辐射进行线性回归，分析太阳辐射在每个年代际的线性变化情况，发现敦煌市太阳总辐射在1980年代以85.9 MJ·m^{-2}·a^{-1}的速率呈显著上升趋势，1990年代呈略上升的趋势，其余年代际均呈下降的趋势，尤其是2000年代下降的尤为明显。

对1971—2020年敦煌市年太阳总辐射通过EEMD分解得到从高频到低频的4个IMF分量和1个趋势项(res)，如图2所示，它们各自反映了原太阳总辐射序列中固有的不同特征尺度的振荡。IMF1~IMF4分量均呈现出多波动特征，每个模态的波动频率和振幅对年太阳辐射数据的特征影响用方差贡献率来表示，结合图2和表1，占主导位置的是IMF1、IMF2、IMF3和res，即表明敦煌市太阳总辐射主要有以上几个分量所决定，IMF1方差贡献率为27.8%，对年太阳总辐射贡献最大，其周期为2.9 a，在21世纪10年代前后它的波动振幅相对较大，其余时段变化相对平稳；具有7.1 a准周期的IMF2的方差贡献率仅次于IMF1，达23.8%，在20世纪80年代后期到90年代初和21世纪10年代振幅明显大于其他时段；IMF3方差贡献率为22.0%，周期为16.7 a，在20世纪80年代初期前和21世纪10年代出现较大波动振幅，趋势项的方差贡献率高达15.9%，高于IMF4。从趋势项分量反映出敦煌市年太阳总辐射序列总体随时间变化的上升趋势，从表2可知,非线性上升速率为68.1 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$，明显高于线性上升的速率。此外，IMF1、IMF2、IMF3和res与原始序列的相关系数通过了0.01的显著性检验，即呈显著相关。

由于使用EEMD进行分解的过程中引入了白噪声，通过能量谱密度-周期的分布对IMF分量进行显著性检验，可判断所分解到的IMF是否为真实有效信号的IMF分量，也可证明所分析的结果是否可行。图3为经EEMD分解后各分量的能量谱密度-周期分布，横轴表示平均周期，纵轴表示经EEMD分解后各分量IMF的能量谱密度的自然对数，从图3可以看出，res、IMF1、IMF2和IMF4在95%的置信区间以上，表明2.9 a (IMF1)、7.1 a (IMF2)和33.3 a

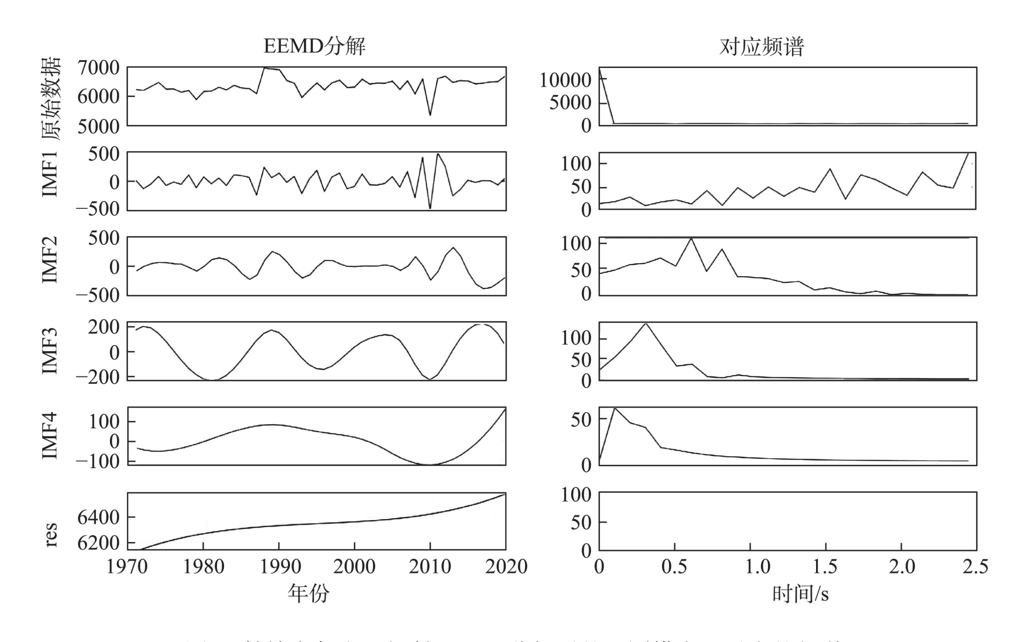


图2 敦煌市年太阳辐射EEMD分解后的不同模态和对应的频谱

Fig. 2 Different modes and corresponding spectrum of EEMD decomposition of annual solar radiation in Dunhuang City

表1 EEMD分解后不同模态的敦煌市年太阳总辐射周期及方差贡献率

Tab. 1 The annual total solar radiation period and variance contribution rate of Dunhuang City with different modes after EEMD decomposition

EEMD分量	方差贡献率	与原序列相关系数	周期/a
IMF1	27.8%	0.668**	2.9
IMF2	23.8%	0.300**	7.1
IMF3	22.0%	0.433**	16.7
IMF4	10.6%	0.250	33.3
趋势项(res)	15.9%	0.286**	-

注:**表示通过0.01显著性检验,*表示通过0.1显著性检验。下同。

表2 敦煌市1971—2020年EEMD分解趋势项太阳辐射变化与线性回归太阳辐射变化比较

Tab. 2 Comparison of solar radiation variation and linear regression solar radiation variation of EEMD decomposition trend term in Dunhuang City from 1971 to 2020

时间尺度	辐射变化/[MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$]	
	线性回归	EEMD趋势项
年	49.6	68.1
春季	32.4	34.5
夏季	13.4	29.0
秋季	2.9	4.7
冬季	1.1	2.7

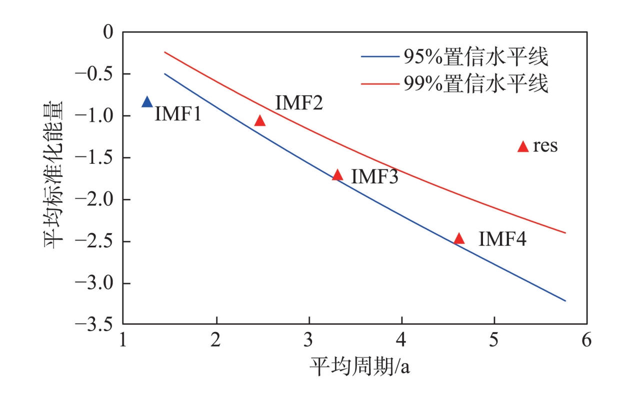


图3 1971—2020年敦煌市太阳辐射序列经EEMD分解的各分量信号的显著性检验

Fig. 3 Significance test result of each component of the solar radiation sequence decomposed by EEMD in Dunhuang City during 1971−2020

(IMF4)的周期性震荡显著,这些尺度的周期在辐射变化过程中表现的能量较强,而16.7 a (IMF3)的周期震荡不显著,表现能量较弱。

2.2 太阳总辐射的季节变化

敦煌市太阳总辐射四季分明,辐射量夏季(2175.1 MJ·m^{-2})>春季(1911.7 MJ·m^{-2})>秋季(1356.1 MJ·m^{-2})>冬季(911.1 MJ·m^{-2}),夏季辐射量最高,冬季最低,冬季平均为夏季的42%,其主要原因是夏季太阳高度角最高,日照时间最长,所以接收到的天文辐射就大。为更好地了解太阳辐射的季节变化,对春、夏、秋、冬季作线性拟合,近50 a春、夏、秋、冬季的太阳总辐射线性倾向率为32.4、13.4、2.9 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$和1.1 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$,均呈不同程度的增加态势,与年总辐射的特征类似(图4),从EEMD趋势项分量反映出敦煌市春、夏、秋、冬季的太阳总辐射序列总体随时间变化的上升趋势,非线性上升速率分别为34.5、29.0、4.7 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$和2.7 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$,可以看出,非线性上升速率均高于线性上升速率,与年太阳总辐射的变化类似。

敦煌市春季太阳辐射波动较大,夏季次之,秋季和冬季较为稳定。太阳辐射的增加主要来自春季和夏季增加的贡献。分析敦煌市四季太阳总辐射的年代际距平变化(表3)可知,四季太阳辐射的年代际变化趋势不尽相同,春季太阳总辐射最多年代与最少的年代与年太阳辐射特征相同,2010年代最多,比多年平均值偏多101.5 MJ·m^{-2},其次是1990年代,1970—1980年代和2000年代均是负距平,1970年代太阳总辐射最小,比多年平均值偏少59.5 MJ·m^{-2};夏、秋季和冬季与春季有所不同,均是1980年代最多,其次是2010年代,1970年代和1990—2000年代均是负距平,1970年代春季、夏季和秋季太阳辐射最小,冬季则是1990年代相对较小。综上所述,敦煌市春季太阳辐射量在2010年代最多,1970年代最少;夏、秋季和冬季太阳辐射最多均在1980年代,最少略有不同,春、夏季和秋季在1970年代,冬季在1990年代。

对敦煌市各季节的太阳总辐射进行EEMD分解(表4),分离出不同的时间变化信号。以春季为例,太阳总辐射具有3.1 a和7.7 a的年际变化和11.1 a和25.0 a的年代际变化,IMF1、IMF2、IMF3和趋势项对原始数据的方差贡献率较高,且均与原序列的相关系数通过0.01的显著性检验;夏季太阳总辐射具有2.9 a和7.1 a的年际变化和16.7 a和25.0 a的年代际变化,IMF1、IMF2、IMF3和趋势项对原始数据的累计方差贡献率为85.9%,其中,IMF1和IMF3与原

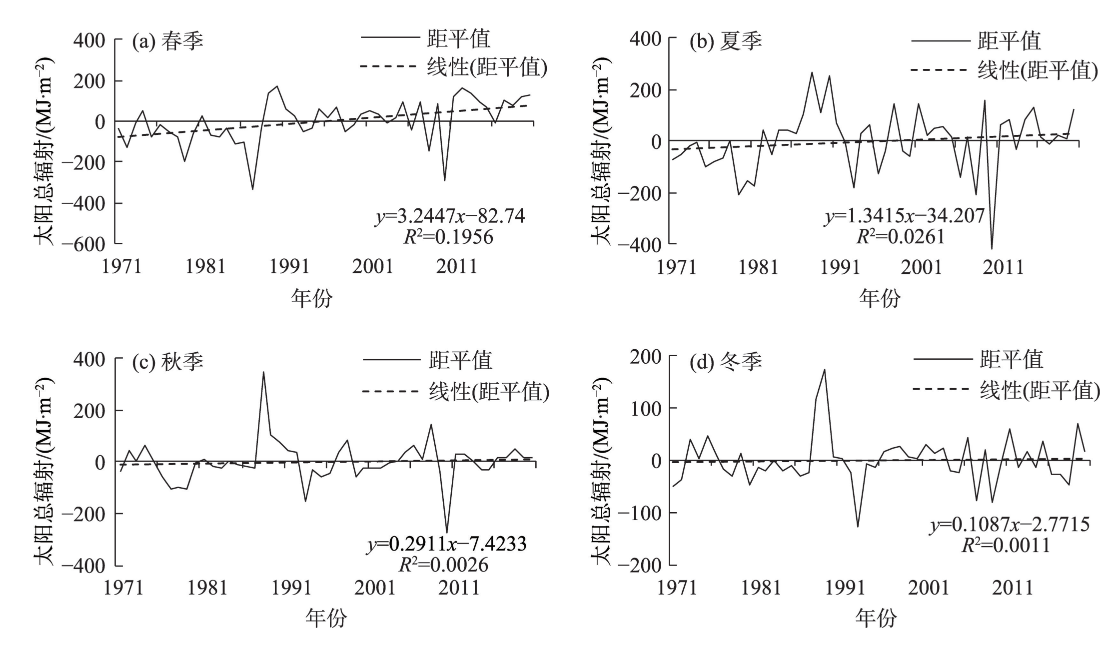


图4 1971—2020年敦煌市四季总辐射年际变化

Fig. 4 Interannual variation of total radiation in Dunhuang City from 1971 to 2020

表3 敦煌市太阳总辐射季节的年代际距平变化

Tab. 3 Interdecadal anomalies of total solar radiation in Dunhuang City during the four seasons

	春季	夏季	秋季	冬季
1970s	−59.5	−73.5	−30.3	−7.0
1980s	−43.7	67.7	44.8	18.3
1990s	12.8	−13.2	−16.5	−9.4
2000s	−11.1	−30.7	−10.0	−8.0
2010s	101.5	49.7	12.0	6.1

序列的相关系数通过0.01的显著性检验；秋季太阳总辐射具有3.4 a和9.1 a的年际变化和16.7 a和33.3 a的年代际变化，IMF1、IMF2、IMF3和IMF4对原始数据的累计方差贡献率为92.3%，其中，IMF1、IMF2和IMF3与原序列的相关系数通过0.01的显著性检验；冬季太阳总辐射具有2.8 a和5.3 a的年际变化和12.5 a和33.3 a的年代际变化，IMF1、IMF2和IMF3对原始数据的累计方差贡献率为87.0%，其中，IMF1、IMF2和IMF3与原序列的相关系数通过0.01的显著性检验。

2.3 太阳辐射的月变化

通过敦煌站1971—2020年近50 a月平均辐射变化图(图5)分析可得，太阳月总辐射变化呈"单峰型"，月总辐射从3月开始急剧增加，5月达峰值(756.68 MJ·m^{-2})，6月开始逐渐递减，12月达全年最低值(261.51 MJ·m^{-2})，最低值仅为最高值的1/3左右。敦煌站5—7月实测总辐射均在700 MJ·m^{-2}以上，每年4—8月辐射量占全年总辐射的56%，是太阳能资源最丰富的时段。从各月气候倾向率看，

表4 EEMD分解后不同模态的敦煌市各季节太阳总辐射周期及方差贡献率

Tab. 4 The total solar radiation period and variance contribution rate of Dunhuang Cityin different seasons after EEMD decomposition

	EEMD分量	方差贡献率	与原序列相关系数	周期/a
春季	IMF1	33.2%	0.701**	3.1
	IMF2	17.3%	0.568**	7.7
	IMF3	15.4%	0.322**	11.1
	IMF4	10.6%	0.134	25.0
	res	23.6%	0.452**	–
夏季	IMF1	28.9%	0.665**	2.9
	IMF2	18.6%	0.239	7.1
	IMF3	21.8%	0.404**	16.7
	IMF4	14.1%	0.230	25.0
	res	16.8%	0.206	–
秋季	IMF1	30.0%	0.508**	3.4
	IMF2	28.5%	0.544**	9.1
	IMF3	21.6%	0.400**	16.7
	IMF4	12.2%	0.155	33.3
	res	7.7%	0.081	–
冬季	IMF1	34.5%	0.679**	2.8
	IMF2	27.7%	0.635**	5.3
	IMF3	24.8%	0.488**	12.5
	IMF4	5.9%	0.040	33.3
	res	7.1%	0.107	–

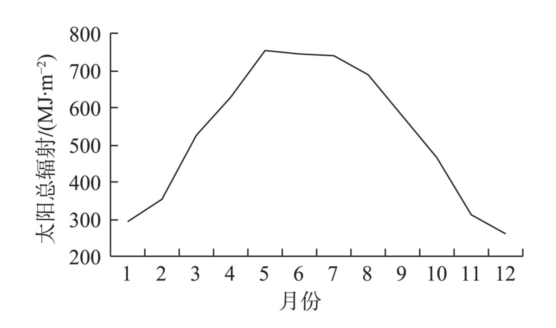


图5　1971—2020年敦煌月平均太阳总辐射分布

Fig. 5　Distribution of monthly average total solar radiation in Dunhuang City during 1971−2020

1—9月太阳总辐射呈增加趋势,其中,3—4月气候倾向率通过显著性检验,4月增加幅度最大,气候倾向率为13.42 MJ·$(10a)^{-1}$。10—12月呈减少趋势,未通过显著性检验,12月减少幅度相对较大。从表5可以看出,绝大多数月份太阳总辐射增加的速度远大于减少的速度。

2.4　不同典型天气条件下太阳总辐射的小时变化

图6为不同典型天气条件下太阳总辐射小时分布,为了消除日出日落差异的影响,尽可能选取不同年份同一月份同一天的典型个例(本文选取时间为4月10日),图中晴天、扬沙、阴天和有降水天气的时间分别是2018年、2020年、2017年和2019年,从图7可以看到,在晴天时,一日中太阳总辐射呈单峰型,最大值出现在12:00—13:00,平均值为3.28 MJ·m^{-2},20:00—5:00太阳总辐射值为0,反映出太阳辐射强度与太阳高度角的对应关系,太阳高度角越大,太阳辐射强度越强,中午12:00—13:00是太阳高度角最大的时候。在扬沙、阴天和有降水的情况下,对太阳辐射到达地表有很大的削弱作用,峰值仅占晴天时的一半左右,且太阳总辐射峰值出现时间随天空云量、降水和沙尘天气出现时间的不同而有所不同,峰值基本出现在10:00—13:00左右,也反映了不同天气条件下太阳总辐射的差异性。

2.5　太阳总辐射突变分析

1971—2020年敦煌市年太阳辐射M-K突变检验结果显示,年太阳辐射整体呈上升趋势。2001—2020年增幅超过置信区间临界线,为显著上升,有明显增加趋势,1997年为年太阳辐射变化的突变点(图7a)。春季辐射2001—2020年*UF*曲线超过α=0.05显著水平临界线,*UF*曲线持续上升,表明该阶段辐射变化显著,且*UF-UB*曲线交于2000年(图7b),该年为辐射变化的突变点。夏季太阳辐射突变检验中(图7c),1987—1996年、1998年、2001—2005年多个时间段超过置信区间,呈显著上升趋势,*UF-UB*曲线交于1982年,该年为辐射变化的突变点。秋季(图7d)和冬季(图7e)太阳辐射的*UF-UB*曲线几乎均处于显著性水平α=0.05置信区间内,表明秋季和冬季太阳辐射无显著变化。但在1979年和1987年前后秋季和冬季辐射有明显的下降上升趋势,所以,1979年和1987年为秋季和冬季辐射变化较大的转折点。秋季*UF*曲线在1971—1974年、1979—1992年呈明显的上升趋势,1974—1979年呈快速下降趋势,1993—2020年波动性幅度较小,变化比较平稳。冬季太阳辐射与秋季明显不同,呈现出"两升两降"的阶段性变化,1971—1975年和1988—2004年呈明显的上升趋势,1976—1987年和2002—2020年呈波动性下降趋势。

2.6　影响敦煌市地面太阳总辐射的关键性气象因素

由表6可知,敦煌市太阳总辐射变化与相对湿度、总云量、降水量和沙尘日数等气象要素的关系较为密切。相对湿度能在一定程度上反映大气中的水汽含量情况,由于水汽对太阳总辐射有吸收作用[40],到达地表时将减少4%~15%[41],相对湿度较太阳总辐射变化平稳很多,敦煌是50 a间相对湿度总体趋于下降,但下降趋势不显著,与太阳总辐射呈反相关。1971—2020年敦煌市蒸发量以93.7 mm·$(10a)^{-1}$的速率呈显著增加的趋势,与太阳总辐射呈正相关。

到达地表的总辐射是天文辐射经过大气减弱所得到的量,与天空晴朗程度有关。总辐射与当日天空中云量的关系十分密切,云量多时到达地表的总辐射就少,反之则多。1971—2020年,敦煌年平均总云量为4.4成,呈增加的趋势,平均每10 a增加

表5　敦煌市各月太阳总辐射气候倾向率

Tab. 5　The climatic tendency rate of monthly total solar radiation in Dunhuang City　/[MJ·m^{-2}·$(10a)^{-1}$]

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
气候倾向率	0.23	2.12	10.94**	13.42**	8.08	4.78	4.18	4.46	3.54	−0.11	−0.52	−1.48

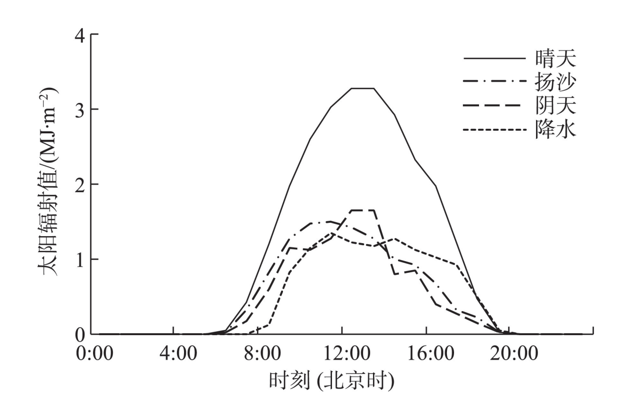


图6 不同典型天气条件下敦煌太阳总辐射小时分布

Fig. 6 The hourly distribution of total solar radiation in Dunhuang City under different typical weather conditions

16%,从表6可以看出,敦煌市太阳辐射与四季总云量均呈弱负相关。沙尘天气影响大气透明度,沙尘天气多,说明大气的透明度差,对太阳辐射有很大的削弱作用,1971—2020年敦煌年和四季的沙尘日数均呈显著的下降趋势,沙尘日数主要出现在春季和夏季,太阳总辐射与年、春季和夏季的沙尘日数呈显著负相关。从表6还可以看出,该区域太阳辐射量变化与同期降水量和总云量总体上呈弱负相关,这是与敦煌市所处的地理环境和气候特点决定的,敦煌市年降水量仅40 mm,云量少,晴天日数多,光照充足,属太阳辐射高能区。另外,辐射受季节影响比较明显的是春季、夏季和秋季。

影响太阳辐射变化的气象因子并不是单一的[42],它们之间相互作用、相互影响,为了定量研究各因素的影响程度,对上述气象因素利用SPSS软件进行多因子分析。首先验证所选气象要素数据是否适用于因子分析,通过KMO和巴特里球形度结果判断,KMO值为0.632,$P<0.05$,表示选取的气象因子数据符合做因子分析的标准。根据各气象因素解释的总方差(表7)可知,共提取出3个因子,而且3个因子的方差解释率分别为42.212%、21.027%和17.034%,累计方差贡献率为80.273%,说明本次因子分析结果良好。

本文对各因子根据其含义为其命名,从而更好

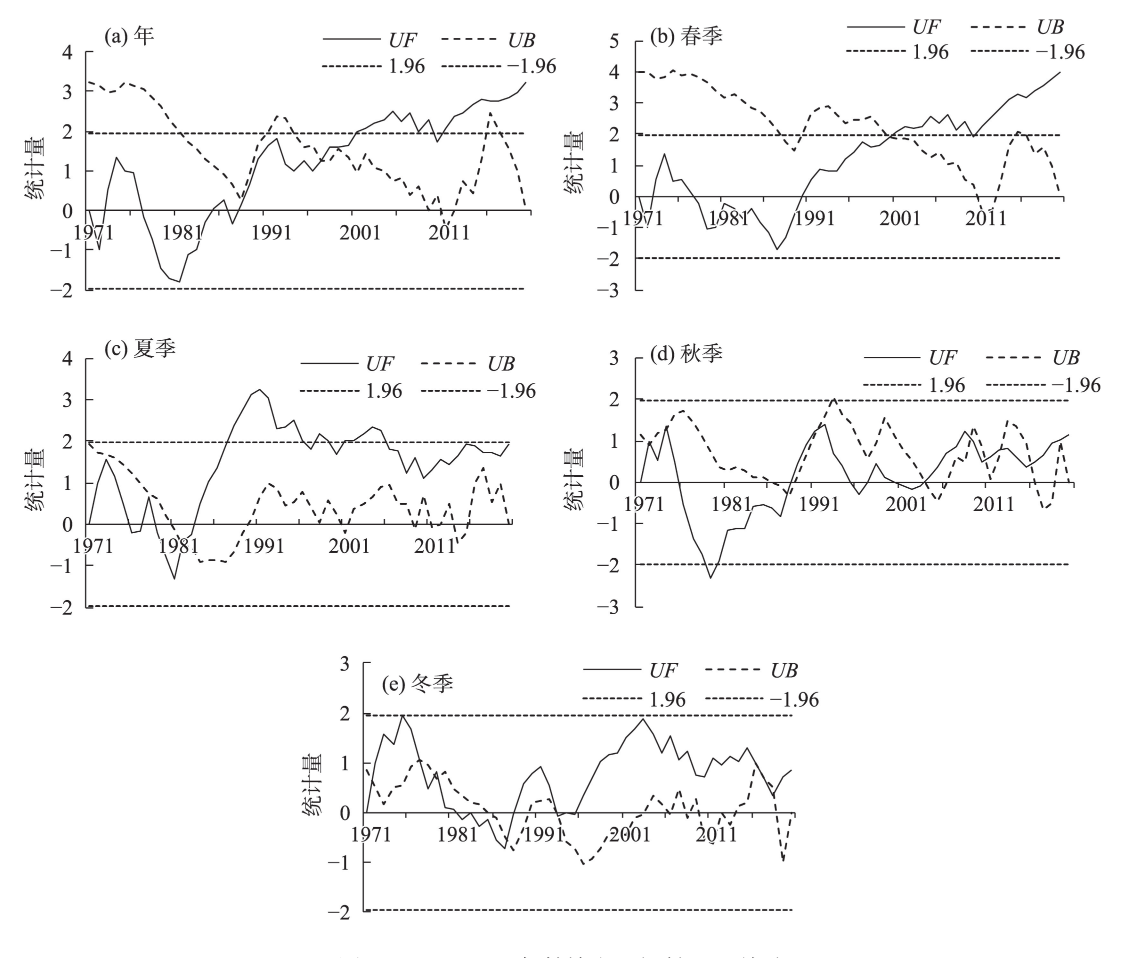


图7 1971—2020年敦煌太阳辐射M-K检验

Fig. 7 M-K test of solar radiation in Dunhuang City from 1971 to 2020

表6 敦煌市太阳总辐射与气象要素相关分析

Tab. 6 Correlation analysis between total solar radiation and meteorological elements in Dunhuang City

气象要素	春季	夏季	秋季	冬季	年
相对湿度	−0.38**	−0.28*	−0.25*	−0.10	−0.25*
沙尘日数	−0.45***	−0.23*	0.05	−0.13	−0.29*
降水量	−0.01	−0.22	−0.42**	−0.20	−0.17
总云量	−0.22	−0.16	−0.19	−0.32*	0.01

注:*、**和***分别表示通过了0.1、0.05和0.001的显著性水平检验。

表7 影响太阳辐射的气象因素总方差解释

Tab. 7 Interpretation of total variance of meteorological factors affecting solar radiation

成分	初始特征值			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比	累计/%	总计	方差百分比	累计/%
一	3.952	49.572	49.572	3.849	48.212	48.212
二	2.123	20.327	69.899	2.054	19.827	68.039
三	1.044	12.674	82.573	1.025	12.234	80.273
四	0.961	7.641	90.214			
五	0.652	6.561	96.775			
六	0.232	3.225	100.000			

表8 旋转后的成分矩阵

Tab. 8 Composition matrix after rotation

	成分		
	一	二	三
相对湿度			−0.753
沙尘日数	−0.825		
降水量			−0.628
总云量		−.652	

地对变量作出说明,通过Kaiser方差最大旋转,因子经过3次正交旋转,如表8所示,公共因子一在沙尘日数要素中载荷值较大,这个要素主要衡量影响太阳辐射的大气透明度条件,因此,将第一公因子称为影响太阳辐射的大气透明度因子。

公共因子二在总云量载荷值较大,主要衡量影响太阳辐射的光照条件,可以称为影响太阳辐射光照因子,第三公共因子在降水量和相对湿度载荷值较大,主要衡量影响太阳辐射的湿度条件,可以称为影响太阳辐射湿度因子。根据因子分析结果,通过SPSS的数据转换功能计算各因子的综合得分及排名(表略),不同的年份影响太阳辐射的主导因子有所差异,2002年以前以第一公共因子占据主导地位,2014年以后以第二公共因子占据主导地位,其余年份均以第三公共因子占据主导,50 a因子综合得分呈显著的上升趋势,与太阳总辐射的变化趋势高度一致。

3 讨 论

太阳能作为一种可再生能源,它的开发利用受到广泛关注。在降碳目标的驱动下,低碳应用的发展方向成为众多行业的焦点,由于到达地面的太阳辐射量和变化趋势存在区域差异,本文以敦煌市太阳辐射为研究对象,对该区太阳辐射的时空变化特征及影响因素进行了细致研究。分析影响到达地面太阳辐射的气象因子主要有云、大气水汽和透明度条件等,研究表明影响敦煌市辐射变化各气象因子中,相对湿度、总云量、降水量和沙尘日数是主要因素;但不同地区影响太阳总辐射的因素有所差异,陈娟等[43]指出,云量是影响高原总辐射变化的主要因素;陈芳等[44]认为,青海省总辐射的阶段性特征与该同时期的云雨状况和全球火山喷发事件有关;郝玉珠等[45]认为,风速对太阳辐射量也存在一定的影响,但风速的大小对辐射量的影响是不同的,针对敦煌市风速对太阳辐射的影响是正反馈还是负反馈需要展开详细研究。

4 结 论

基于敦煌市1971—2020年太阳总辐射序列,利用集合经验模态分解(EEMD)方法,揭示了敦煌市

50 a太阳总辐射演变的多时间尺度特征,分析了不同时间尺度上的周期振荡对太阳总辐射总体特征的影响程度,探讨影响敦煌市太阳辐射的关键气象因素。结果表明:

(1) 1971—2020年敦煌市年太阳总辐射线性气候倾向率为49.6 $MJ\cdot m^{-2}\cdot(10a)^{-1}$,上升趋势显著,多年平均年辐射量为6354.0 $MJ\cdot m^{-2}$,属太阳能资源最丰富区。年辐射在1970年代最少,2010年代辐射达近50 a最大值。敦煌市太阳总辐射年代际特征分明,太阳总辐射最少的时期是1970年代,最多的时期是2010年代,1980年代太阳总辐射呈显著上升趋势,1990年代呈略上升的趋势,其余年代际均呈下降的趋势,尤其是2000年代下降尤为明显。

(2) 敦煌市太阳辐射四季分明,辐射量夏季>春季>秋季>冬季,分别以32.5、13.4、2.9 $MJ\cdot m^{-2}\cdot(10a)^{-1}$和1.1 $MJ\cdot m^{-2}\cdot(10a)^{-1}$的速率增加。近50 a敦煌市太阳总辐射以2.9 a和7.1 a的年际变化和16.7 a的年代际变化占主导地位;敦煌市年和季节的太阳辐射EEMD分解的趋势项非线性上升速率均高于线性上升速率。

(3) 月太阳总辐射变化呈"单峰型",从3月开始急剧增加,5月达峰值,6月开始逐渐下降,12月达全年最低值。4—8月辐射量占全年总辐射的56%,是太阳能资源最丰富的时期。各月气候倾向率差异较大,1—9月太阳总辐射呈增加趋势,增加幅度最大的是4月,10—12月呈减少趋势,减少幅度最大的是12月。太阳总辐射小时分布呈单峰型,一日中最大值出现在12:00—13:00,平均值为2.43 $MJ\cdot m^{-2}$。

(4) 年、春季和夏季太阳总辐射变化的突变时间为1997年、2000年和1982年,秋季和冬季太阳总辐射无显著变化,未出现突变。

(5) 敦煌市太阳总辐射变化与相对湿度、总云量、降水量和沙尘日数的影响较为密切,与太阳辐射均呈负相关。不同季节各气象因子与太阳辐射的相关性有差异性。通过因子分析发现,影响太阳辐射的这些气象要素可以归纳为3个因子:大气透明度因子、光照因子和湿度因子。

参考文献(References):

[1] 和清华, 谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 308-319. [He Qinghua, Xie Yun. Research on the climatological calculation method of solar radiation in China [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 308-319.]

[2] Tang W J, Yang K, Qin J, et al. A 16-year dataset (2000-2015) of high-resolution (3 h, 10 km) global surface solar radiation[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1905-1915.

[3] 赵海涵, 潘学标, 王紫文. 内蒙古中部地区总辐射日曝辐量计算方法研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1786-1793. [Zhao Haihan, Pan Xuebiao, Wang Ziwen. Estimation of daily solar radiation in central Inner Mongolia[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(7): 1786-1793.]

[4] 王卫东, 李净, 张福存, 等. 基于BP神经网络的太阳辐射预测——以兰州市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 185-189. [Wang Weidong, Li Jing, Zhang Fucun, et al. Simulation of solar radiation in Lanzhou based on BP neural network[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(2): 185-189.]

[5] 普宗朝, 张山清, 宾建华, 等. 新疆乌-昌地区太阳能资源精细化时空变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 33-39. [Pu Zongchao, Zhang Shanqing, Bin Jianhua, et al. Solar energy resource spatial-temporal variation in Urumqi-Changji region of Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 33-39.]

[6] 孟圆悦, 闫增峰, 王江丽, 等. 龙门石窟大卢舍那像龛太阳辐射特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 129-138. [Meng Yuanyue, Yan Zengfeng, Wang Jiangli, et al. Research on solar radiation characteristics in Vairocana Buddha niche in Longmen Grottoes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6): 129-138.]

[7] Diaz H, Bradley R S, Eischeid J K. Precipitation fluctuations over global land areas since the late 1800's[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(D1): 1195-1210.

[8] Yang Y H, Zhao N, Hao X H, et al. Decreasing trend of sunshine hours and related driving forces in North China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 97(1): 97-98.

[9] Wild M, Ohmura A, Gilgen H, et al. Validation of GCM simulated radiative fluxes using surface observations[J]. Journal of Climate, 1995, 8(5):1309-1324.

[10] Liepert B G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and world from 1961 to 1990[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(10): 61-64.

[11] Wild M, Ohmura A, Makowski K, et al. Impact of global dimming and brightening on global warming[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(4): 1-4.

[12] 马金玉, 罗勇, 申彦波, 等. 近50年中国太阳总辐射长期变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(10): 1597-1608. [Ma Jinyu, Luo Yong, Shen Yanbo, et al. Regional long-term trend of ground solar radiation in China over the past 50 years[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 42(10): 1597-1608.]

[13] 陈志华. 1957—2000年中国地面太阳辐射状况的研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2005. [Chen Zhihua. Study on Surface Solar Radiation during 1957-2000 over China[D]. Bei-

jing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 2005.]

[14] 姚玉璧, 郑绍忠, 董宏昌, 等. 中国西北地区太阳辐射时空分异特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 863-873. [Yao Yubi, Zheng Shaozhong, Dong Hongchang, et al. Anomaly temporal-spatial distribution of solar radiation in Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 863-873.]

[15] 杨羡敏, 曾燕, 邱新法, 等. 1960—2000年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 243-248. [Yang Xianmin, Zeng Yan, Qiu Xinfa, et al. The climatic change of global solar radiation over the Yellow River Basin during 1960-2000[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(2): 243-248.]

[16] 申彦波, 王标. 近50年中国东南地区地面太阳辐射变化对气温变化的影响[J]. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1457-1465. [Shen Yanbo, Wang Biao. Effect of surface solar radiation variations on temperature in South-East China during recent 50 years[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(6): 1457-1465.]

[17] 谢今范, 张婷, 张梦远, 等. 近50 a东北地区地面太阳辐射变化及其原因分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(12): 2127-2134. [Xie Jinfan, Zhang Ting, Zhang Mengyuan, et al. Change and reason analysis of ground solar radiation in Northeast China over recent 50 years[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(12): 2127-2134.]

[18] 蔡子颖, 郑有飞, 刘建军, 等. 长江三角洲地面太阳辐射变化和相关因素分析[J]. 气象科学, 2009, 29(4): 447-453. [Cai Ziying, Zheng Youfei, Liu Jianjun, et al. Analysis of solar radiation and relative factors inYangtze River Delta of China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2009, 29(4): 447-453.]

[19] 郭晓宁, 保广裕, 郑玲, 等. 格尔木地区光伏电站周边区域太阳辐射特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(6): 47-52. [Guo Xiaoning, Bao Guangyu, Zheng Ling, et al. Analysis on the characteristics of solar radiation of the photovoltaic power station area in golmud [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(6): 47-52.]

[20] 杨凤娟, 亢燕铭, 刘琼, 等. 新疆地面太阳辐射及其CERES/SSF卫星资料适用性研究[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1401-1410. [Yang Fengjuan, Kang Yanming, Liu Qiong, et al. Surface solar radiation in Xinjiang and the applicability of CERES/SSF satellite data[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1401-1410.]

[21] 钱莉, 刘明春, 杨永龙, 等. 1960年至2009年河西走廊东部太阳辐射变化规律及太阳能资源利用分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 823-828. [Qian Li, Liu Mingchun, Yang Yonglong, et al. Characteristics of change in solar radiation and solar energy resources use over the eastern Hexi Corridor[J]. Resources Science, 2011, 33(5): 823-828.]

[22] 武丹. 甘肃河西地区日照辐射探究[J]. 科学技术创新, 2019(14): 38-39. [Wu Dan. Exploration of sunshine radiation in Hexi region of Gansu[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(14): 38-39.]

[23] 赵煜飞, 廖捷, 张强, 等. 1991—2020年中国地面气候值数据集研制[J]. 大气科学, doi: 10.3878/ j.issn. 1006-9895. 2204. 22010. [Zhao Yufei, Liao Jie, Zhang Qiang, et al. 1991-2020 China Climate Normals[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, doi: 10.3878/ j.issn. 1006-9895. 2204. 22010.]

[24] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 126-127. [China Meteorological Administration. Specifications for Surface Meteorological Observation[M]. Beijing: Meteorological Press, 2003: 126-127.]

[25] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2011, 1(1): 1-41.

[26] 楼俊伟, 张鑫, 王可欣, 等. 1951—2016年秦巴山区霜期变化的时空特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(5): 82-88. [Lou Junwei, Zhang Xin, Wang Kexin, et al. Spatial and temporal characteristics of frost period changes in Qinling-Daba Mountain area from 1951 to 2016[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(5): 82-88.]

[27] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005. [Zhu Wenquan. Estimation of Net Primary Productivty of Chinese Terrestrial Vegetation Based on Remote Sensing and its Relationship with Global Climate Change[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2005.]

[28] Huston M A, Wolverton S. The global distribution of net primary production: Resolving the paradox[J]. Ecological Monographs, 2009, 79(3): 343-377.

[29] 焦翠翠, 于贵瑞, 展小云, 等. 全球森林生态系统净初级生产力的空间格局及其区域特征[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 699-709. [Jiao Cuicui, Yu Guirui, Zhan Xiaoyun, et al. Spatial pattern and regional characteristics of global forest ecosystem net primary productivity[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 699-709.]

[30] 冯晓莉, 刘彩红, 林鹏飞, 等. 1953—2017年黄河源区气温变化的多尺度特征[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(3): 333-344. [Feng Xiaoli, Liu Caihong, Lin Pengfei, et al. Multi-timescale features of surface air temperature in the source region of the Yellow River during 1953- 2017[J]. Climatic and Environmental Research, 2020, 25(3): 333-344.]

[31] 李慧群, 付遵涛. 基于EEMD的中国地区1956—2005年日照变化的趋势分析[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2012, 48(3): 393-398. [Li Huiqun, Fu Zuntao. Sunshine duration's trend behavior based on EEMD over China in 1956-2005[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(3): 393-398.]

[32] Li Yonghong, Davis C H. Improved methods for analysis of decadal elevation- change time series over Antarctica[J]. IEEE Transations on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2687-2697.

[33] 黄进, 柳艺博, 张方敏. 基于EEMD我国粮食主产区农业旱情对

气候变化的响应[J]. 水土保持学报 2023, 37(5): 337-344. [Huang Jin, Liu Yibo, Zhang Fangmin. Responses of agricultural drought in China's main grain production areas to cimatic changes based on EEMD[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 337-344.]

[34] 鲁洪威, 马释宇, 李婷婷, 等. 基于EMD模型的我国马铃薯产量波动及其成因的时空研究[J]. 中国农业资源区划, 2021, 42(2): 109-119. [Lu Hongwei, Ma Shiyu, Li Tingting, et al. Temporal-spatial analysis of potato yield fluctuation andits causes in China based on EMD model[J]. Journal of Aericultural Resources and Regional Planning Chinese, 2021, 42(2): 109-119.]

[35] 张硕, 邓博文, 许瑶瑶, 等. 1958-2019年漠河市气温及降水突变分析[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(6): 666-676. [Zhang Shuo, Deng Bowen, Xu Yaoyao, et al. Abrupt change of temperature and precipitation in Mohe of China from 1958 to 2019[J]. Climatic and Environmental Research, 2020, 25(6): 666-676.]

[36] 蒋琳, 贾天山, 熊世为, 等. 1970—2019年滁州市降水特征分析[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(5): 177-180, 192. [Jiang Lin, Jia Tianshan, Xiong Shiwei, et al. The characteristic analysis of precipitation in Chuzhou city during 1970-2019[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(5): 177-180, 192.]

[37] 王依婷. 基于EEMD-BP组合模型的新疆阿克苏地区地表净太阳辐射预测研究[D]. 上海: 上海第二工业大学, 2021. [Wang Yiting. Prediction of Surface Net Solar Radiation in Aksu Area of Xinjiang Based on EEMD-BP Combination Model[D]. Shanghai: Shanghai Second Polytechnic University, 2021.]

[38] 茆美琴, 龚文剑, 张榴晨, 等. 基于EEMD-SVM方法的光伏电站短期出力预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 17-24. [Mao Meiqin, Gong Wenjian, Zhang Liuchen, et al. Short-term photovoltaic generation forecasting based on EEMD-SVM combined method [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 17-24.]

[39] Huang N E, Hen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-Stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.

[40] 陈少勇, 邢晓宾, 张康林, 等. 中国西北地区太阳总辐射的气候特征[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1444-1451. [Chen Shaoyong, Xing Xiaobin, Zhang Kanglin, et al. Climatic characteristics of total solar radiation in Northwest China[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1444-1451.]

[41] 徐玉貌, 刘红年, 徐桂玉. 大气科学概论[M]. 南京: 南京大学出版社, 2000: 102. [Xu Yumao, Liu Hongnian, Xu Guiyu. An Introductory Survey of Atmospheric Sciences[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2000: 102.]

[42] 吴霞, 姜志伟, 蒙荣, 等. 河套平原太阳辐射变化特征及其与气象要素的相互影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 41-53. [Wu Xia, Jiang Zhiwei, Meng Rong, et al. Variation characteristics of solar radiation and the interaction with meteorological elements in the Hetao Plain[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 41-53.]

[43] 陈娟, 徐丹丹, 罗宇翔, 等. 近50年来云贵高原太阳辐射变化特征及影响[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(S1): 179-184. [Chen Juan, Xu Dandan, Luo Yuxiang, et al. Changes in solar radiation and their climatic influences over Yunnan-Guizhou Plateau for 1961-2019[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(S1): 179-184.]

[44] 陈芳, 马英芳, 李维强. 青海高原太阳辐射时空分布特征[J]. 气象科技, 2005, 33(3): 231-234. [Chen Fang, Ma Yingfang, Li Weiqiang. Distribution characteristics of solar radiation over Qinghai Plateau[J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(3): 231-234.]

[45] 郝玉珠, 李兴华, 胡亚男, 等. 内蒙古57年太阳能资源变化规律及影响因子[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 145-151. [Hao Yuzhu, Li Xinghua, Hu Yanan, et al. Change rules and influencing factors of 57 years of solar energy resources in Inner Mongolia[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(9): 145-151.]

Multi-time scale change characteristics and influencing factors of total solar radiation in Dunhuang City

WANG Yunpeng[1], LI Hongying[1], YAO Yubi[2], LI Dongliang[3], FAN Qiwei[1], LIU Xiangping[4]

(1. Jiuquan Meteorological Bureau, Jiuquan 735000, Gansu, China; 2. Lanzhou Resources and Environment Vocational and Technical University, Lanzhou 730021, Gansu, China; 3. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 4. Dunhuang Meteorological Bureau, Dunhuang 736200, Gansu, China)

Abstract: Using ensemble empirical mode decomposition and the M-K mutation test, the multi-times cale characteristics of the evolution of total solar radiation in Dunhuang city were analyzed based on the meteorological data of total solar radiation, relative humidity, total cloudiness, and dust days in Dunhuang city between 1971 and 2020. The key meteorological factors influencing solar radiation in Dunhuang city were explored. The results show the following: (1) There was a significant upward trend of annual total solar radiation in Dunhuang city between 1971 and 2020, with a linear climate propensity rate of 49.6 $MJ \cdot m^{-2} \cdot (10a)^{-1}$, and the multiyear average annual radiation was 6354.0 $MJ \cdot m^{-2}$, belonging to the area with the most abundant solar resources. The annual radiation was lowest in the 1970s and highest in the 2010s. Dunhuang has four distinct seasons of solar radiation, with radiation increasing at rates of 32.5, 13.4, 2.9, and 1.1 $MJ \cdot m^{-2} \cdot (10a)^{-1}$ in summer > spring > fall > winter, respectively. The total solar radiation in Dunhuang city in the last 50 years was dominated by interannual variations of 2.9 and 7.1 years and interdecadal variations of 16.7 years. (2) Monthly solar radiation varied in a "single-peak" pattern, with a sharp increase in March, a peak in May, a gradual decrease in June, and a yearly minimum in December. The hourly distribution of total solar radiation is monomodal, with the maximum occurring between 12:00 and 13:00 a.m. (3) The annual, spring, and summer solar radiation changes were abrupt in 1997, 2000, and 1982. (4) Meteorological factors affecting solar radiation at Dunhuang can be attributed to three factors: atmospheric transparency, illumination, and humidity, and the correlation between each meteorological factor and solar radiation varies according to the seasons.

Keywords: solar radiation; variation characteristics; ensemble empirical mode method; mutation test; meteorological elements; Dunhuang City